

АДАПТАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАЗГАРА ФУТЕРОВКИ ГОРНА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ К ОБЪЕКТУ ДИАГНОСТИКИ

Золотых М.О., Дмитриев А.Н., Иванов О.Ю., Чесноков Ю.А.

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

Для диагностики состояния футеровки горна доменной печи в течение ее кампании широко применяются методы, основанные на измерении температур внутри массива кладки. Измерение температур производится при помощи термодпар, размещенных между слоями огнеупоров на этапе строительства (капитального ремонта) печи. Построение модели разгара происходит при помощи численного решения уравнения теплопроводности Фурье. Одним из важных параметров в этом уравнении является теплопроводность блоков кладки. От точности определения теплопроводности зависит качество построения модели разгара. В данной работе предложена методика адаптации математической модели за счет определения фактической теплопроводности по кривым нагрева кладки в процессе задувки доменной печи. Данная адаптация позволяет повысить точность оценки состояния кладки за счет исключения систематической погрешности, связанной с неточными исходными данными.

Ключевые слова: доменная печь, горн, футеровка, теплопроводность, термодпары, адаптация, математическая модель, разгар.

To diagnose the condition of the lining of the hearth of the blast furnace during her campaign widely used methods based on the measurement of temperatures inside the array of masonry. Temperature measurement using thermocouples placed between layers of refractory materials during construction (major repair) of the furnace. Model building height is by using the numerical solution of the heat equation Fourier. One of the important parameters in this equation is the thermal conductivity of masonry blocks. On the accuracy of determination of thermal conductivity depends on the quality of model building height. In this paper we proposed a method of adapting a mathematical model by identifying the actual thermal conductivity on heating curves of masonry in the process of sadowky blast furnace. This adaptation improves the accuracy assessment of masonry by eliminating systematic errors associated with uncertainties in the original data.

На сегодняшний день в мире железорудное сырье перерабатывается преимущественно по схеме «доменная печь – конвертер»: в 2012 г. таким образом произведено 1100 млн т чугуна и 1547,8 млн т стали. В это же время способами прямого получения по схеме DRI («металлизация – электроплавка») произведено всего 54,973 млн т стали (в том числе по технологиям Midrex – 60 %, HYL – 17 % и SL/RN – 22 %). Таким образом, на доменное производство приходится более 95 % производимой стали. При этом наибольшее число доменных печей находится в Китае (более 300 печей объемом свыше 1000 м³), второе место принадлежит Японии, а третье – России [1–3].

Предприятия, производящие сталь, находятся в условиях жесткой конкуренции. В этой связи важную роль играет снижение себестоимости про-

изводства металла. При производстве доменно-конверторным способом ощутимый вклад в формирование себестоимости передельного чугуна вносит строительство самой доменной печи [2]. Таким образом ее длительная эксплуатация позволяет снижать себестоимость продукции, тем самым увеличивать прибыль и повышать конкурентоспособность металлургического предприятия. Срок службы доменной печи в большинстве случаев определяется сроком службы кладки металлоприемника.

Для диагностики состояния кладки горна используются различные методы: акустические исследования, отбор кернов, введение радиоактивных изотопов и анализ температурных характеристик. Последние методы контроля являются наиболее перспективными: основным их достоинством является возможность организации мониторинга кладки в реальном времени, без использования дорогостоящего и сложного оборудования и без нарушения прочности самой кладки. Кроме того, ввиду непрерывности процесса диагностики, температурные способы хорошо подходят для информационного обеспечения процесса наращивания и поддержания защитного гарнисажа.

Математическая модель разгара футеровки основывается на численном решении уравнения Фурье [4]:

$$c\rho \frac{\delta t}{\delta \tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) + q_v. \quad (1)$$

В формуле 1 использованы следующие обозначения: τ – время; t – температура; c – теплоемкость вещества; ρ – плотность вещества; λ – теплопроводность вещества и q_v – теплота, выделяющаяся внутри тела (для кладки горна всегда $q_v = 0$). В качестве источников информации о тепловом состоянии кладки используются стандартные термопары, заложенные в футеровку горна на этапе капитального ремонта или строительства доменной печи. В предложенной нами модели решения уравнения весь объем кладки печи сегментируется на элементарные объемы, содержащие в себе температурные датчики. Внутри каждого объема датчики объединяются в расчетные группы, для которых проводится решение одно- или двумерного уравнения. Полученные результаты расчетов для элементарных объемов объединяются в трехмерную модель при помощи механизмов адаптивной интерполяции.

Одними из самых важных параметров в рассматриваемой математической модели разгара футеровки является теплопроводность огнеупоров (λ), так как она определяет градиент температур в стенках печи и, в конечном счете, положение внутренней границы кладки [6]. Заявленная производителем теплопроводность огнеупоров может варьироваться от партии к партии и изменяться в реальных условиях эксплуатации блоков (например, из-за давления внутри кладки). Для решения этой проблемы могут использоваться различные методы. Например, лабораторные исследования образцов кладки (в работах В.Г. Макиенко [7]) или использование вставок из материалов с заранее известной теплопроводностью (в работах Н.А. Спирина [8] и М. Шульте [9]).

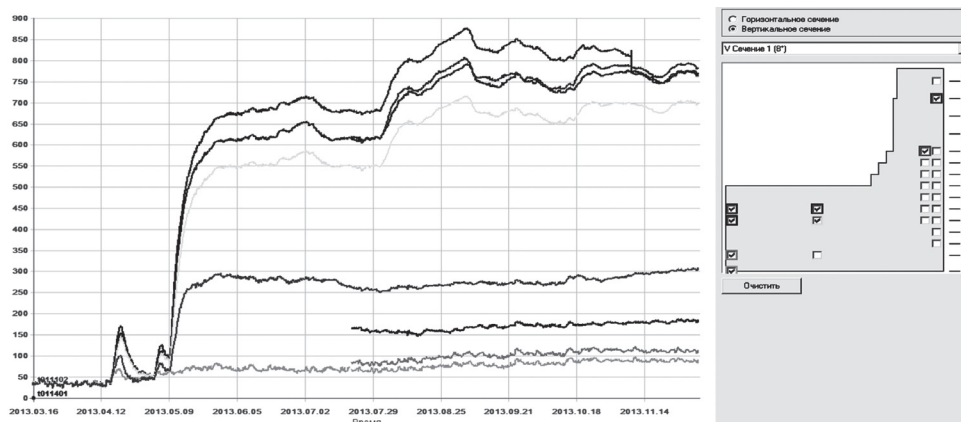


Рис. 1. Кривая разгона температур в кладке доменной печи

В нашей работе предложен алгоритм определения фактической теплопроводности огнеупорных блоков на основе анализа показаний температурных датчиков в процессе задувки печи (кривых разгона). Пример кривой разгона приведен на рис. 1.

Для определения коэффициента теплопроводности огнеупора в лещадки необходимо наличие трех датчиков (расчетной группы), расположенных на одной оси, вертикально друг под другом внутри одного типа огнеупоров. Расчет произведем при помощи дифференциального уравнения теплопроводности Фурье (1) для прямоугольных координат [4]:

$$c\rho \frac{\delta t}{\delta \tau} = \frac{\delta}{\delta x} \left(\lambda \frac{\delta t}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(\lambda \frac{\delta t}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(\lambda \frac{\delta t}{\delta z} \right) + q_v. \quad (2)$$

С учетом следующих ограничений, используемых в нашей работе:

- изотропность по объему огнеупора (коэффициент теплопроводности одинаков во всех направлениях) [7];
- скорость изменения температуры кладки небольшая и ей можно пренебречь (квазистационарный процесс);
- внутренние источники тепла в кладке отсутствуют;
- вблизи расчетной группы тепловой поток одномерен.

Уравнение (2) принимает вид (3):

$$\int \lambda(t) \delta t = C \int \delta x, \quad (3)$$

$$C = \frac{\int_{t_i}^{t_j} \lambda(t) \delta t}{x_j - x_i}.$$

Для расчетной группы, изображенной на рис. 2, имеет место система уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) \delta t}{x_2 - x_1} \\ C = \frac{\int_{t_2}^{t_3} \lambda(t) \delta t}{x_3 - x_2} \end{array} \right. \quad (4)$$

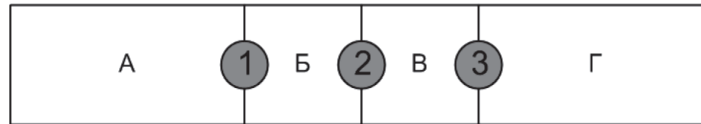


Рис. 2. Датчики в слоях кладки

Если разница температур соседних датчиков (1-2 и 2-3) составляет до 200 °С, то характер изменения теплопроводности на участке от t_1-t_2 и t_2-t_3 принимаем линейным:

$$\frac{(t_2 - t_3) \lambda \left(\frac{t_2 + t_3}{2} \right)}{x_3 - x_2} = \frac{(t_1 - t_2) \lambda \left(\frac{t_1 + t_2}{2} \right)}{x_2 - x_1}, \quad (5)$$

$$\lambda(t_{23cp}) = \frac{(t_1 - t_2)(x_3 - x_2)}{(x_2 - x_1)(t_2 - t_3)} \lambda(t_{12cp})$$

где t_{ijcp} – средняя температура между t_i и t_j .

При анализе динамики разогрева кладки (для различных отсчетов температур) на основе уравнения (5) для каждой расчетной группы может быть сформирована система линейных уравнений, состоящая из выражений вида:

$$\lambda_m(t_{23cp}) = c_i \lambda_m(t_{12cp}). \quad (6)$$

В соотношении (6) i – номер температурного замера для материала m . Для единственной произвольной температуры t_0 из множества t_{12cp} коэффициент теплопроводности материала m может быть обозначен как λ_0 . Тогда на основе системы линейных уравнений вида (6) может быть численно интерполирована функцией $\lambda_m(t)$:

$$\lambda_m(t) = \lambda_0 c_m(t). \quad (7)$$

Здесь c_m – функция, определяющая характер зависимости λ_m от температуры t с точностью до постоянного коэффициента λ_0 .

При определенной расстановке датчиков для всех материалов кладки могут быть получены зависимости теплопроводности от температуры с точностью до постоянного коэффициента λ_0 . Этого достаточно для построения

предлагаемой нами модели разгара кладки, так как в силу особенности модели при расчете могут использоваться не абсолютные значения теплопроводности, а их отношение друг к другу.

Если необходимо получить абсолютные значения теплопроводности для решения каких-либо задач, не связанных с построением модели разгара, они могут быть найдены путем количественного определения λ_0 . Это можно сделать при помощи выражения (3) с использованием теплового потока C через лещади или стенку печи. При этом достаточно одного измерения, соответствующего любому уравнению вида (7). Определение теплового потока может быть произведено по данным системы охлаждения (перепады температур на выходе и выходе холодильника и расход теплоносителя).

На основе предложенной модели специалистами Института радиоэлектроники и информационных технологий – РтФ Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (ИРИТ-РтФ УрФУ) и Института металлургии Уральского отделения Российской академии наук (ИМЕТ УрО РАН) было разработано специализированное программное обеспечение. На разработку получены авторские свидетельства № 2014610768 и № 2014610769. Внедрение программного обеспечения и исследование применимости модели было начато в 2010 г. на печах КНР. Перечень печей, на которых была опробована модель приведен в таблице.

Внедрение программного обеспечения

№ п.п.	Предприятие	Печь	Год внедрения
1	JiNan Iron & Steel Group Co.Ltd	№ 4, 3200 м ³	2010
2	JiYuan Iron & Steel Group Co.Ltd	1080 м ³	2011
3	LiuZhou Iron & Steel Group Co.Ltd	2500 м ³	2012
4	JiNan Iron & Steel Group Co.Ltd	№ 3, 1750 м ³	2013
5	JiNan Iron & Steel Group Co.Ltd	№ 1, 1750 м ³	2014

Список использованных источников

1. Новости рынка металлов [Электронный ресурс] // <http://www.metaltorg.ru/n/99F442> (дата обращения: 01.02.2014).
2. Новости рынка металлов [Электронный ресурс] <http://www.metaltorg.ru/n/99F32F> (дата обращения: 01.02.2014).
3. Новости рынка металлов [Электронный ресурс] <http://www.metaltorg.ru/analytics/ores/?id=573> (дата обращения: 01.02.2014).
4. Телегин А.С., Швыдкий А.С., Ярошенко Ю.Г. Тепло-массоперенос. – М.: Металлургия, 1995. – 400 с.
5. Hong-bo Zhao, Shu-sen Cheng. Optimization for the structure of BF hearth bottom and arrangement of thermal couples // *Journal of University of Science and Technology Beijing* Volume 13, Number 6, 12/2006. Pages 497-503.
6. Дмитриев А.Н., Чесноков Ю.А., Чэнь К., Иванов О.Ю., Золотых М.О. Система контроля разгара огнеупорной футеровки горна доменной печи // *Сталь*. – 2013. – № 11. – С. 8–14.
7. В.Г.Макиенко, Р.С.Думбур, ООО НПП «АЧМА», В.П. Русских, ПГТУ, М.Я. Васильевич, Н.В. Косолап, ОАО «ММК им. Ильича» Автоматическая система диагностики состояния футеровки металлоприемника, лещади и продления кампании доменной печи // *Доменное производство – XXI век. Труды Международного конгресса доменщиков*. – М.: Издательский дом «Кодекс», 2010. С. 491–497.
8. Спирин Н.А., Федюлов Ю.В., Новиков В.С., Швыдкий В.С., Лавров В.В. Диагностика состояния футеровки доменных печей по температурному полю кладки // *Сталь*. – 1997. № 10. – С. 13–16.
9. Шульте М., Клима Р., Рингель Д., Фосс М. Контроль износа горна доменной печи с помощью датчиков теплового потока // *Черные металл*. – 1998. – № 4. – С. 17–22.